视觉工作记忆离线态表征的生成机制[1]

李子媛[1] 雷鸣[2] 刘强[1]

（[1]四川师范大学脑与心理科学研究院，成都 610066）（[2]西南交通大学心理研究与咨询中心，成都 611756）

摘要

视觉工作记忆在人类理解动态变化的视界过程中发挥着重要作用。根据工作记忆状态模型，视觉工作记忆表征可以被存储在在线态或离线态，并可依据任务需求在这两种存储态之间灵活切换。然而，目前还不清楚离线态记忆表征如何由在线态表征转换生成。本研究将通过实验检验两种可能的转换加工假设：巩固假设和衰减假设。研究通过采用序列呈现提取范式来有效引导记忆表征分别被存储在两个不同的表征状态中，并在此基础上对状态转换过程相关的刺激间隔时间和呈现时间进行调控。结果显示，当与状态转换过程相关的时间不足时，会导致记忆表征状态的转换过程与新刺激的在线加工过程叠加，从而发生资源竞争。这一结果符合记忆表征状态转换的巩固假设，即工作记忆的离线态表征通过记忆项目的在线态表征巩固进入离线态而形成。

关键词：视觉工作记忆, 状态模型, 离线态表征, 状态转换, 巩固加工

1 前言

视觉工作记忆(visual working memory, VWM)在高级认知功能中发挥着重要作用, 其作为我们短时保持及操控视觉信息的系统，能够在感觉、视觉长时记忆、决策及动作之间提供可利用的操作平台，是人类基于视觉信息进行复杂认知加工的基础(Aben et al., 2012; Baddeley, 1992; Eriksson et al., 2015; Miller et al., 2018)。VWM 系统能够同时存储的信息量十分有限，同时由于日常认知任务的复杂性及动态性，我们通常需要同时维持多个信息，并根据任务的先后需求进行相继的提取调用，这就需要根据当前任务需求将工作记忆信息以不同的神经状态进行表征和存储。据此，研究者们提出了工作记忆状态模型，其认为大脑会根据信息的优先性将工作记忆信息分别存储在不同的状态：在线态和离线态(de Vries et al., 2020; Nee & Jonides, 2013; Oberauer, 2002; LaRocque et al., 2014; Chota & Van der Stigchel, 2021)。那些与当前任务相关的记忆表征，会被赋予较高优先性并被存储在在线态。记忆表征的在线态存储会伴随有持续的神经活动，因此可通过脑电波或神经成像设备探测到这些表征的神经信号，比如对侧延迟活动(contralateral delay activity, CDA) (Lewis-Peacock et al., 2012; LaRocque

---

[1] 收稿日期：2023-8-10
国家自然科学基金项目(31970989)资助
通讯作者：刘强, E-mail：lq780614@163.com

et al., 2013; Stokes, 2015; Oliver, 2011)。而那些暂时与当前任务无关的记忆表征，则会被赋予较低优先性并暂时从在线态卸载并通过离线态进行短暂存储；当这些离线态记忆表征在后续任务中需要时，它们会被重新调入在线态来完成认知加工任务(Manohar et al., 2019; Stokes et al., 2020; Rose, 2020)。与在线态表征的存储机制不同，离线态存储不伴随神经活动，他们被认为是通过暂时改变细胞间突触联结权重的方式存储记忆信息，因此无法通过神经成像设备探测到与其相关的神经活动(Mongillo et al., 2008; Kamiński & Rutishauser, 2020; Muhle-Karbe et al., 2021)。

虽然离线态记忆表征无法被直接观察测量，但是大量研究证据都已证实离线态存储的存在。比如，研究者们发现，在同时记忆多个项目的过程中，如果先通过线索告知被试某个项目即将被探测，而其他未线索化项目将在线索化项目被探测后间隔一段时间再进行探测，那么未线索化项目的相关神经激活在线索化项目被探测之前将回到基线水平，同时他们的神经活动解码率也将处于随机水平。但如果在项目维持期间，向保持未线索化项目的脑皮层施加TMS(Transcranial magnetic stimulation)刺激，或者在未线索化项目的呈现位置处呈现一个强视觉刺激，将会导致这些未线索化项目的解码率显著高于随机水平，出现再激活效应。而如果未线索化项目在线索出现后不再被探测，施加同样的 TMS 或者强视觉刺激则不会出现再激活效应(Rose et al., 2016; Wolff et al., 2015, 2017)。这些结果被认为是支持离线态存储是以变化突触权重进行信息存储的有力证据。Zhang 等人(2022)应用脑电技术，首次验证了序列记忆提取范式是可以有效诱发离线态存储的实验范式。在该范式中，被试首先依次记忆两个以一定间隔出现的阵列，随后先探测第二个记忆阵列(阵列 2)，再探测第一个出现的记忆阵列(阵列 1)。作者认为，由于阵列 2 会先被探测，因此在阵列 2 出现到被探测完成期间，被试的当前任务只与阵列 2 相关。为高效完成实验任务，一个更好的策略是将阵列 1 暂时存储到离线态。该假设与研究的脑电结果一致，即与在线存储阵列 1 相关的脑电 CDA 成分，在阵列 2 出现后消失，但是对于阵列 1 的测试成绩却显著高于随机水平。这一结果表明，在序列记忆提取范式下，阵列 1 在阵列 2 呈现后能够被有效诱导转存进离线态记忆系统。基于序列记忆提取范式，Zhang 等人(2022)通过调控离线态记忆存储期间的认知干扰和存储时长等变量，发现离线态作为工作记忆的一种重要存储形式，能够保护记忆表征有效抵制无关刺激干扰和时间衰减。进而 Li 等人(2021)通过分别调控在线态和离线态的记忆负荷，发现在线态与离线态的记忆信息维持之间互不干扰。这表明，在线态和离线态之间具有相互独立的存储资源。

从研究离线态存储的实验任务来看，记忆项目会先进入在线态进行表征，然后在与当前任务无关且后续任务还需要再被提取的情况下，被转到离线态进行暂时存储。然而，目前尚

无研究探讨记忆表征从在线态转换到离线态这一加工过程的认知机制。对这一问题的考察将有助于深化对记忆表征存储状态转换的理解，明晰离线态表征如何生成，并为工作记忆的动态存储模式提供新的实证证据。在这里，我们提出关于表征状态转换的两种可能性假设，并进行实验验证。一种是如传统的理论观点所认为的，刺激信息进入一个记忆系统需要经过一个特定的巩固加工过程。记忆表征由在线态转换到离线态也需要有一个巩固加工过程，这一加工过程需要一定的时间和认知资源以实现记忆表征从在线态存储系统到离线态存储系统的信息表征模式的转变，我们将该假设称为巩固假设。在该假设下，刺激信息先被编码进在线态，即以神经激活模式进行信息维持，而后在任务需要的前提下记忆信息再由在线态转换到离线态进行存储。状态转换意味着记忆表征由大脑神经激活模式转变为突触模式。然而，在线到离线巩固过程也未必是一定存在的，工作记忆的“激活-沉默态”模型认为，刺激信息被编码进入在线态时，其诱发神经激活的同时会改变神经元之间的突触联结权重(Stokes, 2015)。据此可知，刺激信息的离线态表征会伴随在线态表征同步产生，但在在线表征维持期间，离线态表征还处于非独立状态，会依存于在线态表征。如果在线态表征被干扰发生变化，离线态表征的内容会与其同步变化。当该记忆信息与当前任务暂时无关时，其神经激活模式消失，只留下突触模式，此时独立稳定的离线态记忆表征才真正形成。按此假设，离线态记忆表征的形成可能不需要特定的巩固加工过程，只需让该记忆信息的神经激活模式自然消亡，我们将该假设称为衰减假设。

在本研究中，我们将基于序列记忆提取范式对以上两种状态转换假设进行验证。验证的实验操控基础来自于 Zhang 等人(2022)的实验结果。在他们的研究三中，当两个记忆阵列以 0.8 秒间隔和 0.2 秒呈现时间出现时，尽管阵列 1(离线态存储)相关的 CDA 在阵列 2(在线态存储)呈现后消失，但是离线存储的记忆成绩却受到在线存储负荷变化的影响。该结果与两状态存储资源相互独立理论(Li et al., 2021)相违背。我们认为导致这一结果的原因是，阵列 1 在刺激呈现后 0.8 秒时尚未完成由在线到离线的表征状态转换。在这种情况下，对阵列 2 的编码加工将影响阵列 1 从在线态到离线态的转换加工。而这一影响根据不同的状态转换假设可以有不同的解读。根据巩固假设，阵列 2 出现后，其需要被巩固进工作记忆在线态，而阵列 1 的记忆表征则需要从在线态巩固进入离线态。由于阵列 2 呈现时间较短(0.2 秒)，在有效完成阵列 1 记忆表征的转换后，阵列 2 的刺激信息可能已经消失。因此，为了能够更有效地完成实验任务，大脑可能会权衡对两个刺激阵列信息的巩固加工时间，迫使两个巩固过程叠加，发生资源竞争，从而导致阵列 2(在线态存储）的记忆负荷变化影响阵列 1 巩固进入离线态过程，表现为阵列 1（离线态存储）记忆成绩受到损害。而根据衰减假设，阵列 1 的神经激活模式在刺激消失后 0.8 秒时还未完全消退，此时呈现的阵列 2 视觉刺激会对阵列 1

的在线记忆表征造成干扰，这一干扰效应同样表现为阵列 1 记忆成绩受到损害。以上两个假设最大的分歧点在于，当状态转换在 0.8 秒延迟间隔期间未完成情况下，阵列 2 的呈现时间能否调控在线认知加工对离线态记忆成绩的影响。具体来说，根据巩固假设，延长阵列 2 的呈现时间可以使阵列 1 的离线巩固过程和阵列 2 的在线巩固过程序列进行，从而消除阵列 2 负荷变化对阵列 1 记忆成绩的影响。而根据衰减假设，由于阵列 2 出现时阵列 1 的神经激活模式尚未消失，无论阵列 2 的呈现时间长短，其始终会影响阵列 1 的成绩表现，因此无法通过调控阵列 2 的呈现时间来消除阵列 2 对阵列 1 离线态存储的影响。

基于以上推论，实验一通过操控记忆阵列之间的延迟间隔和阵列 2 的负荷，来验证延迟间隔不足是导致离线态记忆成绩受在线态记忆负荷影响的原因，进而确定阵列 1 不能有效完成表征状态转换的时间。实验二在确定的延迟间隔条件下，调控阵列 2 的呈现时间及其负荷来验证关于表征状态转换的两种假设。当阵列 1 在延迟间隔期间无法完成状态转换时，如果延长阵列 2 的呈现时间，离线态记忆成绩不再受在线态负荷变化的影响，那么巩固假设成立；否则，衰减假设成立。

2 实验 1

本实验旨在验证 Zhang 等人(2022)所观察到的在线态记忆负荷变化影响离线态记忆成绩，是由于记忆阵列之间较短的延迟间隔未能使阵列 1 记忆表征完成由在线态到离线态的转换所导致。为此，我们将采用序列记忆提取范式，在固定阵列 1 记忆负荷的基础上，调控阵列 2 的负荷。重点是在 Zhang 等人(2022)的 0.8 秒记忆阵列间隔的基础上，增加 1 秒间隔条件。如果阵列 1 记忆表征需要长于 0.8 秒的间隔来完成从在线到离线的状态转换，我们预测，在 0.8 秒间隔条件下，将重复 Zhang 等人(2022)的实验结果，观察到阵列 2 负荷变化对阵列 1 记忆成绩有显著影响。而在 1 秒间隔条件下，阵列 2 记忆负荷变化对阵列 1 的干扰效应将显著降低甚至消失。

2.1 方法

2.1.1 被试

通过 G*Power 3.1 软件计算所需样本量，效应量(dz)为 0.65，α水平为 0.05，结果显示 28 名被试能够达到 80%的统计检验力。当前两个实验均招募 30 名被试。实验 1 的 30 名被试中有 5 名男性，平均年龄为 21.97 岁(SD: 2.70)。他们的视力或矫正视力正常，无色盲色弱。所有被试在实验开始前都签署了知情同意书，并在实验后获得 30 元的报酬。所有实验均符合赫尔辛基宣言，并获得四川师范大学人类研究机构审查委员会批准。

2.1.2 实验设备和刺激

我们使用 E-prime2.0 软件来运行程序，LCD 电脑屏幕大小为 19 英寸，60HZ 刷新率

(1920×1080 像素)，屏幕背景为灰色(125×125×125)，屏幕中心始终呈现一个黑色注视点(0.23°)。注视点周围出现的色块作为记忆刺激(0.49°×0.49°)，其颜色从蓝、黑、红、品红、绿、青、白、黄、紫这九种颜色中随机选择。在同一个试次中，所有记忆刺激的颜色不会重复出现。两个记忆阵列中的项目均位于一个以注视点为中心的隐形正方形(1.80°×1.80°)的外围上。阵列 1 中的两个色块处于注视点的水平左右两侧；阵列 2 的色块位于注视点垂直上下两侧(呈现两个色块时)，或者分布在隐形正方形的四个端点处(呈现四个色块时)。两个探测阵列序列呈现，依次探测阵列 2 和阵列 1。探测 1 中呈现黑色边框正方形，其位置和数量与阵列 2 相同，其中一个涂上颜色。探测 2 中黑色边框正方形的位置和数量与阵列 1 相同，其中一个涂上颜色。被试到屏幕注视点的观看距离为 70 厘米。所有被试在实验任务过程中需要集中注意力。被试的行为表现通过按键反应来记录。

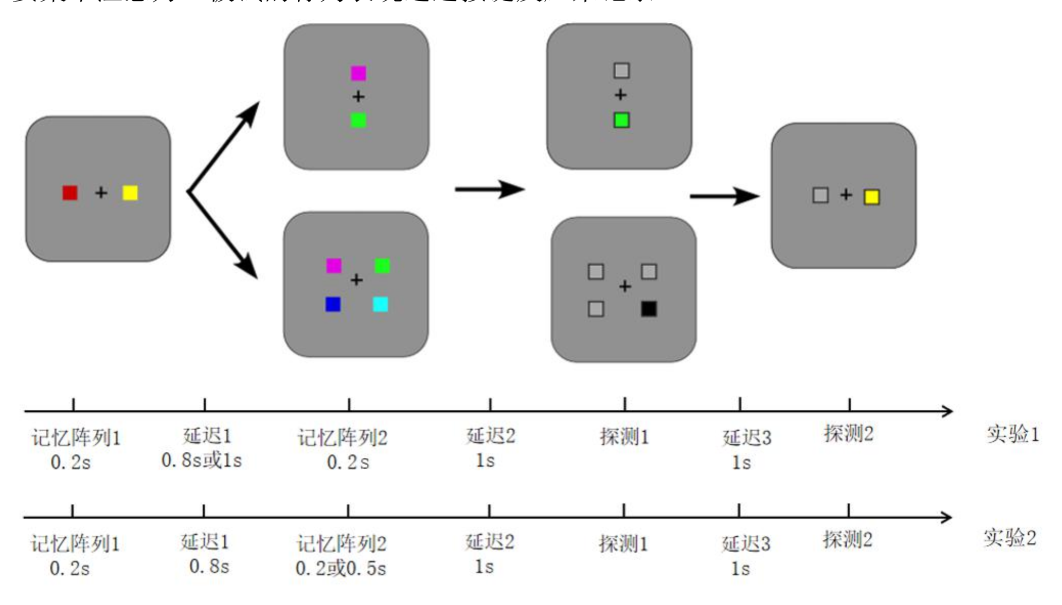


图 1：两个实验的流程示意图

2.1.3 实验流程

如图 1 所示，阵列 1 呈现两个记忆项目，持续时间为 0.2 秒。随后出现 0.8 秒(短间隔条件)或 1 秒(长间隔条件)的空白间隔，阵列 2 出现，持续 0.2 秒，其包含两个或四个项目。阵列 2 消失 1 秒后，两个探测阵列序列呈现，依次探测阵列 2 和阵列 1，并以 1 秒的间隔隔开。被试需要判断探测阵列中的色块颜色是否和记忆阵列中相应位置上的色块颜色相同，若相同，则按“z”键，否则按“m”键。实验过程中，我们要求被试更加注重反应正确率而非速度，因此只有当被试做出按键反应之后，探测阵列才会消失。探测项目的颜色与记忆项目颜色相同和不同的试次各占 50%。在“不同”反应的试次中，探测颜色与同一试次中其它颜色都不同。阵列之间的延迟间隔为组块设计，而阵列 2 的项目数量(2 vs.4)在每个试次中随机出现。每个被试需要完成长间隔条件和短间隔条件各 5 组，每组包含 32 个试次。间

隔条件顺序在被试间平衡。在正式实验开始前，每个被试先阅读指导语，并完成至少 8 个练习试次，确保他们熟悉整个实验流程。为防止语音编码对视觉工作记忆结果产生干扰，每组实验开始前给被试随机呈现一组数字要求他们在实验过程中默读 (Shaffer & Shiffrin, 1972)。

2.1.4 数据分析

本研究主要的结果分析指标为行为正确率。所有数据通过 JASP 软件进行分析(Love et al., 2019)。在实验结果部分，我们报告η^2_p作为重复测量方差分析结果的效应量，效应量小、中、大的区分临界点分别是 0.01，0.06 和 0.14。我们使用配对样本 t 检验来分析在线态记忆负荷变化分别对在线态和离线态记忆成绩的影响，Cohen's d 将被用于反映效应量。0.2 ≤ Cohen's d < 0.5，表示小效应量；0.5 ≤ Cohen's d < 0.8，表示中等效应量，Cohen's d ≥ 0.8，表示大效应量。

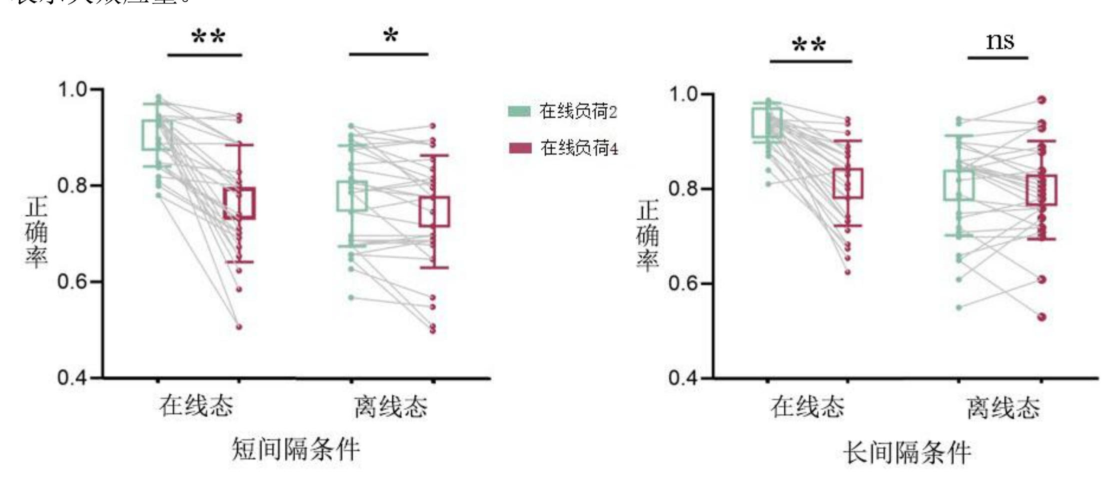


图 2：实验 1 的行为正确率结果

注：**表示 p < 0.01，*表示 p < 0.05。

2. 2 结果讨论

图 2 为实验 1 行为结果，探测 1 反映在线态记忆成绩，探测 2 反映离线态记忆成绩，所有自变量均为被试内因素。首先，我们进行 2 (在线负荷：2 vs. 4) × 2 (记忆成绩：在线态 vs. 离线态) × 2 (延迟间隔: 0.8s vs. 1s)重复测量方差分析。结果表明，在线负荷，记忆成绩和延迟间隔这三个因素的主效应均显著，$Fs > 16.10$, $ps < 0.001$, $\eta^2_p s > 0.36$；在线负荷和记忆成绩之间的交互作用显著，$F(1, 29) = 45.26$, $p < 0.001$, $\eta^2_p = 0.61$。接着，我们分别对短间隔条件和长间隔条件下的记忆成绩进行分析。

对于短间隔条件下的行为结果，2 (在线负荷：2 vs. 4) × 2 (记忆成绩：在线态 vs. 离线态)重复测量方差分析结果显示，记忆成绩和在线负荷的主效应均显著，$Fs > 10.09$, $ps < 0.004$, $\eta^2_p s > 0.26$，记忆成绩和在线负荷之间的交互作用显著，$F(1, 29) = 17.52$, $p < 0.001$, $\eta^2_p = 0.38$。配对样本 t 检验分析结果显示，在线态记忆成绩在高负荷条件下显著低于低负荷条件，t (29)

= 6.75, $p < 0.001$, Cohen's $d = 1.23$, 95% CI [0.75, 1.70]。同样地，离线态记忆成绩随着在线记忆负荷增大而显著降低，$t(29) = 3.044$, $p = 0.005$, Cohen's $d = 0.56$, 95% CI [0.16, 0.94]。长间隔条件下的 2 × 2 重复测量方差分析结果表明，记忆成绩和在线负荷的主效应均显著，$F\text{s} > 16.02$, $p\text{s} < 0.001$, $\eta^2_p\text{s} > 0.36$，记忆成绩和在线负荷有显著的交互作用，$F(1, 29) = 36.24$, $p < 0.001$, $\eta^2_p = 0.56$。配对样本 t 检验结果显示，在线态记忆负荷增多，该存储态的记忆成绩显著下降，$t(29) = 8.68$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 1.59$, 95% CI [1.04, 2.12]。然而，离线态记忆成绩不随在线态负荷变化而变化，$t(29) = 0.81$, $p = 0.42$, Cohen's $d = 0.15$, 95% CI [–0.21, 0.50]。

短间隔条件下的行为结果与 Zhang 等人(2022)的结果一致。重要的是，当两个记忆阵列的间隔延长至 1 秒时，阵列 1(离线态存储)的记忆成绩不再受阵列 2(在线态存储)负荷变化的影响。这表明，当阵列之间的延迟间隔足够长时，阵列 1 足以完成从在线态到离线态的巩固过程(巩固假设)，或者阵列 1 的在线激活模式足以完全消退，只留下突触模式(衰减假设)，从而避免阵列 2 的在线加工对阵列 1 记忆成绩产生影响。虽然当前结果无法判定记忆表征状态转换符合巩固假设还是衰减假设，但是该结果为解释 Zhang 等人(2022)研究结果与资源分离理论相违背的原因提供了部分依据，即，0.8 秒的延迟间隔不足以让阵列 1 的记忆表征顺利完成从在线到离线的状态转换，从而使这一转换过程持续进行至阵列 2 出现期间。

3 实验 2

实验 2 的目的是通过调控阵列 2 的呈现时间来验证记忆表征状态转换的两个假设。实验 1 的结果表明，0.8 秒的延迟间隔不足以使阵列 1 完成表征状态转换，导致这一过程持续进行至阵列 2 呈现期间；但在间隔延迟为 1 秒时，阵列 1 的表征状态转换过程则能够顺利完成。在实验 2 中，我们在 0.8 秒延迟间隔的基础上，分别以 0.2 秒和 0.5 秒的刺激呈现时间呈现阵列 2。我们预测，在 0.2 秒呈现条件下，将继续观察到阵列 2 负荷变化对阵列 1 记忆成绩的影响。但是在 0.5 秒呈现时间条件下，两种表征状态转换假设将有不同的结果预测。如果巩固假设成立，我们预期，阵列 1(离线态存储)成绩不再受阵列 2(在线态存储)记忆负荷变化的影响。因为阵列 1 的记忆表征状态转换加工在刺激后延迟间隔 1 秒时即可完成，而此时阵列 2 还会再继续呈现 0.3 秒，足以满足阵列 2 的编码加工。在这种情况下，阵列 2 到在线态的巩固加工过程完全可以被延迟到阵列 1 离线态的转换加工完成以后再进行，将可避免两个过程的叠加影响。如果衰减假设成立，由于 0.8 秒的延迟间隔不足以使阵列 1 的神经激活模式完成自然消亡，阵列 2 无论呈现 0.2 秒还是 0.5 秒，都将同样程度地干扰阵列 1 的在线态表征，使其记忆成绩发生损害。因此，两种呈现时间条件下都将观察到阵列 2 负荷变化影响阵列 1 记忆成绩。

3.1 方法

3.1.1 被试

30 名被试均为在校大学生，其中有 6 名男性，平均年龄为 22.07 岁(SD: 2.22)。

3.1.2 实验刺激和流程

本实验使用的刺激参数和设备与实验 1 相同，但实验流程上略有差别(如图 1)。在本实验中，两个记忆阵列之间的时间间隔固定为 0.8 秒。阵列 2 的呈现时间为 0.2 秒(短呈现条件)和 0.5 秒(长呈现条件)，该阵列仍然随机呈现两个或四个项目。呈现时间为组块设计，每个被试需要完成长、短呈现条件各 5 组，每组有 32 个试次，条件顺序在被试间平衡。在正式实验开始前，被试需要阅读指导语并完成至少 8 个练习试次以便了解整个实验流程。

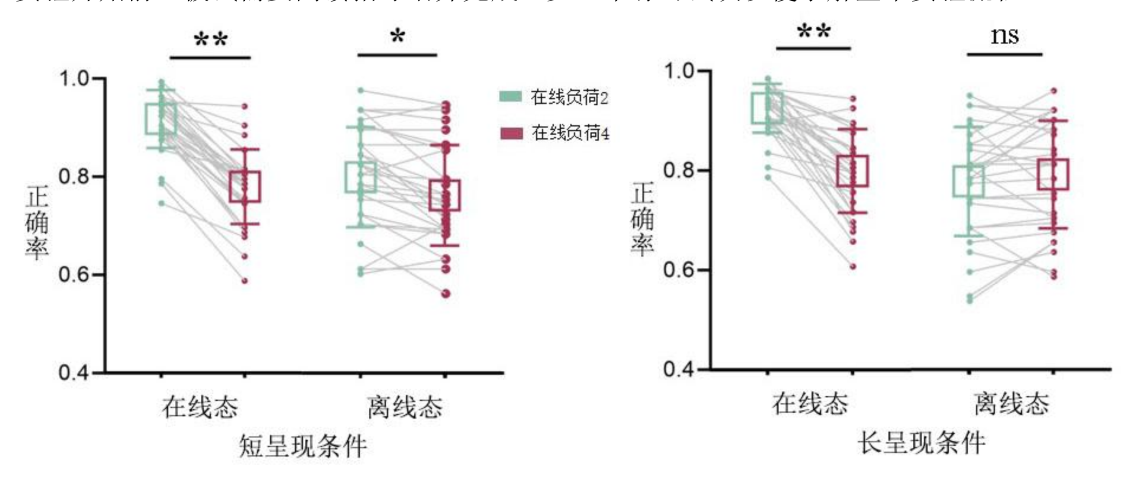


图 3：实验 2 的行为正确率结果

注：**表示 $p < 0.01$，*表示 $p < 0.05$。

3.2 结果讨论

图 3 为实验 2 行为结果。行为正确率结果分析与实验 1 相似。首先进行 2 (在线负荷：2 vs. 4) × 2 (记忆成绩：在线态 vs. 离线态) × 2 (呈现时间: 0.2s vs. 0.5s)重复测量方差分析，结果显示，记忆成绩和在线负荷都有显著的主效应，Fs > 22.96, ps < 0.001, η^2_ps > 0.44；呈现时间和在线负荷之间的交互作用显著，F (1, 29) = 8.23, p = 0.008, η^2_p = 0.22，记忆成绩和在线负荷之间的交互作用也显著，F (1, 29) = 81.68, p < 0.001, η^2_p = 0.74。然后，我们分别分析短呈现和长呈现条件下不同存储态的记忆成绩。

对于短呈现条件下的行为结果，2 (在线负荷: 2 vs. 4) × 2 (记忆成绩：在线态 vs. 离线态)重复测量方差分析结果显示，记忆成绩和在线负荷的主效应均显著，Fs > 19.56, ps < 0.001, η^2_ps > 0.40，记忆成绩和在线负荷之间有显著的交互作用，F (1, 29) = 35.60, p < 0.001, η^2_p = 0.55。配对样本 t 检验结果表明，高负荷条件下的在线态成绩显著低于低负荷条件，t (29) = 14.70, p < 0.001, Cohen’s d = 2.68, 95% CI [1.90, 3.45]。同样地，在线记忆负荷从 2 增加到 4，离线态成绩也有一个显著的下降，t (29) = 3.66, p = 0.001, Cohen’s d = 0.67, 95% CI [0.27,

1.06]。在长呈现条件下，2 × 2 重复测量方差分析结果同样显示一个显著的交互作用，$F(1, 29) = 62.28$, $p < 0.001$, $\eta^2_p = 0.68$，同时，记忆成绩和在线负荷的主效应均显著，$F\text{s} > 18.14$, $ps < 0.001$, $\eta^2_p\text{s} > 0.39$。配对样本 t 检验结果表明，在线态记忆成绩在高负荷条件下显著差于低负荷条件，$t(29) = 8.85$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 1.62$, 95% CI [1.06, 2.16]。然而，在线态高低记忆负荷条件下的离线态记忆成绩没有显著差异，$t(29) = 1.12$, $p = 0.27$, Cohen's $d = 0.21$, 95% CI [–0.57, 0.16]。

综合以上结果可知，阵列 1 在 0.8 秒的延迟间隔条件下无法完成状态转换，因此该过程持续进行至阵列 2 呈现期间。重要的是，延长阵列 2 的呈现时间，能够消除阵列 2 记忆负荷变化对阵列 1 记忆成绩的影响。这一结果模式符合以上提到的状态转换巩固假设，即，延长阵列 2 的呈现时间，阵列 1 的状态转换过程与阵列 2 的在线巩固过程序列进行，从而避免这两个认知过程叠加。也就是说，记忆项目的表征状态转换是指记忆表征从在线态存储系统巩固进入到离线态存储系统。据此可推断 Zhang 等人(2022)研究结果与存储态资源分离理论相违背的原因是由于，0.8 秒的延迟间隔不足以使阵列 1 完成状态转换，同时阵列 2 呈现时间较短，为避免阵列 2 的刺激信息快速消失，阵列 1 向离线态的巩固过程和阵列 2 向在线态的巩固过程叠加，发生资源竞争，导致阵列 1 的记忆成绩发生损害。

4 总讨论

本研究旨在通过序列记忆提取范式考察工作记忆离线态表征是如何由在线态记忆表征转换生成。在实验 1 中，我们对阵列之间的延迟间隔(0.8s vs.1s)和阵列 2 的记忆负荷进行调控。结果发现，在 0.8 秒延迟间隔条件下，阵列 2(在线态存储)的记忆负荷变化对阵列 1(离线态存储)成绩具有显著的影响，但这一影响在 1 秒延迟间隔条件下消失。该结果表明，阵列 1 的记忆表征状态转换加工在记忆刺激消失后 0.8 秒时仍在进行，但在记忆刺激消失 1 秒后则已完成。基于实验 1 的结果，实验 2 采用 0.8 秒的阵列延迟间隔，并分别以 0.2 秒和 0.5 秒的刺激呈现时间呈现阵列 2。结果显示，将阵列 2 的呈现时间从 0.2 秒延长至 0.5 秒，能够消除阵列 2 记忆负荷变化对阵列 1 记忆成绩的影响。该研究结果支持表征状态转换的巩固假设，即记忆项目的离线态表征由在线态表征经由巩固加工过程进入离线态存储系统而形成。

实验一结果表明，在 1 秒的延迟间隔条件下，记忆表征由在线态转换到离线态的加工过程将充分完成。这与已有的脑电研究结果相一致。例如，Wolf 等人(2017)对记忆表征神经活动解码的研究结果发现，在经过 1 秒的间隔之后，表征解码率降到基线水平。而 LaRocque 等人(2013)发现未线索记忆表征的神经活动在线索呈现之后经过大约 1.25 秒消失。这些研究结果都表明，在记忆刺激消失大约 1 秒后将可以生成稳固的离线态记忆表征。进而，这些结果也表明记忆表征由在线到离线状态的转换加工过程，并非由下一个记忆阵列的刺激出现信

号来启动，而是在刺激消失后一个固定的时间开始进行。此外，在 Li 等人(2020)探究影响记忆表征存储态因素的研究中，作者采用序列记忆提取范式，同时调控阵列之间的延迟间隔。结果发现，0.4 秒的延迟间隔不足以启动阵列 1 进行表征状态转换，因此和阵列 2 共同存储在在线态。然而，在 0.8 秒的延迟间隔条件下，两个记忆阵列分别存储在在线态和离线态。这表明，足够长的延迟间隔是启动那些与当前任务暂时无关的记忆信息进行表征状态转换的必要条件。综上可知，生成离线态记忆表征的状态转换涉及两个时间因素：一是启动时间，即状态转换加工过程开始的时间，在该启动时间内呈现下一个记忆刺激将导致无法生成离线态表征；二是转换加工时间，即状态转换加工本身所需要耗费的时间，在启动时间后的转换加工时间内呈现记忆刺激，将对离线态记忆表征的生成产生干扰。

当前的研究结果首次证明了离线态表征的形成并非由于记忆表征神经激活模式的自然消亡，而是存在一个由在线态存储系统到离线态存储系统的巩固加工过程，该过程在一定的时间维度上展开，并与巩固视觉刺激至在线态过程共享认知资源。此外，这些研究结果将有助于我们进一步理解短时离线态记忆存储与长时记忆的关系。从视觉信息认知加工的神经层面来看，在记忆信息的维持阶段，如果突触之间形成稳固且长久的权重联结，则形成刺激信息的长时记忆。而当这些突触权重联结是暂时性的，并会很快被消除时，则形成短时离线态记忆。当前结果表明，记忆表征经由巩固加工过程，进而实现从在线态进入离线态进行短暂存储。这一由认知控制驱动的状态转换巩固加工过程无疑会训练并增强突触存储模式。据此可认为，利用突触联结模式对记忆项目进行短时存储，将有利于这些项目的长时记忆形成。正如以往的研究发现，进入离线态存储的记忆项目有更好的长时记忆表现性能(McCabe, 2008; Rose et al., 2014)。由此可推断，相对于仅需要利用在线态存储的简单记忆探测任务，类似于序列记忆探测任务这种需要利用离线态存储的复杂的工作记忆任务在学习与训练过程中将更加有效。

此外，本研究的结果表明，记忆表征的存储状态转换存在由在线态到离线态的信息巩固过程。对于生成在线态记忆表征的巩固加工过程，其已被证明是以一定的带宽进行的序列巩固模式(Vogel et al., 2006; Scharff & Palmer, 2008; Hao et al., 2017)，且不同的记忆材料具有不同的巩固容量(Mance et al., 2012; Becker et al., 2013; Liu & Becker, 2013)。这就引发了一系列新的研究问题，即当离线态的存储负荷增加时，记忆表征由在线态巩固到离线态的启动时间和转换加工时间是否需要延长，以及记忆项目的表征状态转换时间是否与记忆刺激类型有关。由于在当前研究中，离线态的记忆负荷始终是固定的，所以还难以对此问题进行解答。未来研究需要进一步操控离线态项目表征数量和记忆材料，来深化理解记忆项目表征状态转换机制。

5 结论

综上，本研究通过序列记忆提取范式对工作记忆表征从在线到离线的状态转换这一加工过程进行探究，实验结果表明，记忆项目的离线态表征由在线态表征经由巩固加工过程进入离线态存储系统而形成。这一发现有助于明晰离线态表征的形成过程，同时深化对工作记忆动态存储模式的理解。

参考文献

Aben, B., Stapert, S., & Blokland, A. (2012). About the distinction between working memory and short-term memory. *Frontiers in Psychology, 3, 301*. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00301

Baddeley, A. (1992). Working memory. *Science, 255(5044), 556–559*. https://doi.org/10.1126/science.1736359

Becker, M. W., Miller, J. R., & Liu, T. (2013). A severe capacity limit in the consolidation of orientation information into visual short-term memory. *Attention, Perception, & Psychophysics,75(3),* 415–425.https://doi.org/10.3758/s13414-012-0410-0

Chota, S., & Van der Stigchel, S. (2021). Dynamic and flexible transformation and reallocation of visual working memory representations. *Visual Cognition, 29(7),* 409–415. https://doi.org/10.1080/13506285.2021.1891168

de Vries, I. E. J., Slagter, H. A., & Olivers, C. N. L. (2020). Oscillatory control over representational states in working memory. *Trends in Cognitive Sciences, 24(2),* 150–162. https://doi.org/10.1016/j.tics.2019.11.006

Eriksson, J., Vogel, E. K., Lansner, A., Bergström, F., & Nyberg, L. (2015). *Neurocognitive architecture of working memory. Neuron, 88(1),* 33–46. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2015.09.020

Hao, R., Becker, M. W., Ye, C., Liu, Q., & Liu, T. (2017). The bandwidth of VWM consolidation varies with the stimulus feature: evidence from event-related potentials. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance, 44(5),* 767–777.https://doi.org/10.1037/xhp0000488

Kamiński, J., & Rutishauser, U. (2020). Between persistently active and activity-silent frameworks: novel vistas on the cellular basis of working memory. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1464(1),* 64–75. https://doi.org/10.1111/nyas.14213

LaRocque, J. J., Lewis-Peacock, J. A., Drysdale, A. T., Oberauer, K., & Postle, B. R. (2013). Decoding attended information in short-term memory: an EEG study. *Journal of Cognitive Neuroscience, 25(1), 127–142*. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00305

LaRocque, J. J., Lewis-Peacock, J. A., & Postle, B. R. (2014). Multiple neural states of representation in

short-term memory? It's a matter of attention. In *Frontiers in Human Neuroscience, 8, 5*. https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00005

Lewis-Peacock, J. A., Drysdale, A. T., Oberauer, K., & Postle, B. R. (2012). Neural evidence for a distinction between short-term memory and the focus of attention. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 24(1), 61–79. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00140

Li, Z., Liang, T., & Liu, Q. (2021). The storage resources of the active and passive states are independent in visual working memory. *Cognition, 217, 104911*. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2021.104911

Li, Z., Zhang, J., Liang, T., Ye, C., & Liu, Q. (2020). Interval between two sequential arrays determines their storage state in visual working memory. *Scientific Reports, 10(1), 1–9*. https://doi.org/10.1038/s41598-020-64825-4

Liu, T., & Becker, M. W. (2013). Serial consolidation of orientation information into visual short-term memory. *Psychological Science, 24(6), 1044–1050*. https://doi.org/10.1177/0956797612464381

Love, J., Selker, R., Marsman, M., Jamil, T., Dropmann, D., Verhagen, J., ... & Wagenmakers, E. J. (2019). JASP: Graphical statistical software for common statistical designs. *Journal of Statistical Software, 88(1)*. https://doi.org/10.18637/jss.v088.i02

Mance, I., Becker, M. W., & Liu, T. (2012). Parallel consolidation of simple features into visual short-term memory. *Journal of Experimental Psychology Human Perception & Performance, 38(2), 429–438*. https://doi.org/10.1037/a0023925

Manohar, S. G., Zokaei, N., Fallon, S. J., Vogels, T. P., & Husain, M. (2019). Neural mechanisms of attending to items in working memory. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 101, 1–12*. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2019.03.017

McCabe, D. P. (2008). The role of covert retrieval in working memory span tasks: evidence from delayed recall tests. *Journal of Memory and Language, 58(2), 480–494*. https://doi.org/10.1016/j.jml.2007.04.004

Miller, E. K., Lundqvist, M., & Bastos, A. M. (2018). Working Memory 2.0. *Neuron, 100(2), 463–475*. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2018.09.023

Mongillo, G., Barak, O., & Tsodyks, M. (2008). Synaptic theory of working memory. *Science, 319(5869), 1543–1546*. https://doi.org/10.1126/science.1150769

Muhle-Karbe, P. S., Myers, N. E., & Stokes, M. G. (2021). A hierarchy of functional states in working memory. *Journal of Neuroscience*, *41(20), 4461–4475*. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3104-20.2021

Nee, D. E., & Jonides, J. (2013). Trisecting representational states in short-term memory. *Frontiers in Human*

Neuroscience, 7, 796. https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00796

Oberauer, K. (2002). Access to information in working memory: exploring the focus of attention. *Journal of Experimental Psychology: Learning Memory and Cognition, 28(3), 411–421*. https://doi.org/10.1037/0278-7393.28.3.411

Olivers, C. N. L., Peters, J., Houtkamp, R., & Roelfsema, P. R. (2011). Different states in visual working memory: when it guides attention and when it does not. *Trends in Cognitive Sciences, 15(7), 327–334*. https://doi.org/10.1016/j.tics.2011.05.004

Rose, N. S., Buchsbaum, B. R., & Craik, F. I. M. (2014). Short-term retention of a single word relies on retrieval from long-term memory when both rehearsal and refreshing are disrupted. *Memory and Cognition*, *42(5), 689–700*. https://doi.org/10.3758/s13421-014-0398-x

Rose, N. S., Joshua J. LaRocque, Adam C. Riggall, O. G., & Michael J. Starrett, Emma E. Meyering, B. R. P. (2016). Reactivation of latent working memories with transcranial magnetic stimulation. *Science, 354(6316)*, 1136–1139. https://doi.org/10.1126/science.aah7011.Reactivation

Rose, N. S. (2020). The dynamic-processing model of working memory. *Current Directions in Psychological Science, 29(4)*, 378–387. https://doi.org/10.1177/0963721420922185

Scharff, A., & Palmer, J. (2008). Distinguishing serial and parallel models using variations of the simultaneous-sequential paradigm. *Journal of Vision, 8(6), 981–981*. doi:https://doi.org/10.1167/8.6.981

Shaffer, W., & Shiffrin, R. M. (1972). Rehearsal and storage of visual information. *Journal of Experimental Psychology*, *92*(2), 292–296. https://doi.org/10.1037/h0032076

Stokes, M. G. (2015). “Activity-silent” working memory in prefrontal cortex: a dynamic coding framework. *Trends in Cognitive Sciences, 19(7)*, 394–405. https://doi.org/10.1016/j.tics.2015.05.004

Stokes, M. G., Muhle-Karbe, P. S., & Myers, N. E. (2020). Theoretical distinction between functional states in working memory and their corresponding neural states. *Visual Cognition, 28(5–8)*, 420–432. https://doi.org/10.1080/13506285.2020.1825141

Vogel, E. K., Woodman, G. F., & Luck, S. J. (2006). The time course of consolidation in visual working memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance, 32(6)*, 1436–1451. https://doi.org/10.1037/0096-1523.32.6.1436

Wolff, M. J., Ding, J., Myers, N. E., & Stokes, M. G. (2015). Revealing hidden states in visual working memory using electroencephalography. *Frontiers in Systems Neuroscience, 9*, 123. https://doi.org/10.3389/fnsys.2015.00123

Wolff, M. J., Jochim, J., Akyürek, E. G., & Stokes, M. G. (2017). Dynamic hidden states underlying working-memory-guided behaviour. *Nature neuroscience, 20*(6), 864–871. https://doi.org/10.1038/nn.4546.

Zhang, J., Ye, C., Sun, H.-J., Zhou, J., Liang, T., Li, Y., & Liu, Q. (2022). The passive state: a protective mechanism for information in working memory tasks. Journal of Experimental Psychology: *Learning, Memory, and Cognition. 48(9), 1235–1248*. https://doi.org/10.1037/xlm0001092

Cognitive mechanisms underlying the formation of offline representations in visual working memory

LI Ziyuan[1], LEI Ming[2], LIU Qiang[1]

([1]Institute of Brain and Psychological Science, Sichuan Normal University, Chengdu 610066)

([2]Psychological Research and Counseling Center, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 611756)

Visual working memory (VWM) plays a foundational role in advanced cognitive functions. The state-based models propose a hierarchical organization of functional states, where memory representations with high attentional priority are retained in an online state (i.e., active state), while those with lower priority are kept in an offline state (i.e., passive state) for later use. The memory representations can be dynamically transferred between the two states according to the task demands. However, there was rare work to explore how the memory representations transitioned into the offline state from the online, generating the offline representations. Here, we put forward two hypothesis, the consolidation hypothesis and the fade-away hypothesis.

To explore this question, participants were instructed to remember two sequential memory arrays, with Memory array 2 being detected before Memory array 1. In this memory task, Memory array 1 was held in the offline state during the active maintenance of Memory array 2. Colored squares served as memory stimuli. 30 healthy college students participated in each experiment. We primarily modulated the temporal context related to the state transformation of memory representations: the interval delay between the two memory arrays in Experiment 1 and the

presentation time of Memory array 2 in Experiment 2. The load of online memory varied between two and four in each trial. These variables were within-subject factors. Experiment 1 aimed to verify that the shortage of interval delay between memory arrays led to the failure of state transformation in the condition of 0.8s-interval. Experiment 2 attempted to determine which hypothesis, consolidation or fade-away, aligned better with the state transformation process.

The exploration of representational state transformation was built on the resources-dissociation account, which proposed that the offline representations are independent of the active processing of online representations. Memory arrays 1 and 2 were used to test the offline and online memory, respectively. The results of Experiment 1 showed that variations in online load did not affect offline memory when extending the interval delay from 0.8s to 1s. This indicated that the state transformation of Memory array 1 continued beyond 0.8s after its disappearance and could complete within a 1s-interval. In Experiment 2, the interval was designed at 0.8s. We observed that the online load variation had no impact on offline memory when extending the presentation time of Memory array 2 from 0.2s to 0.5s. This supported the consolidation hypothesis, indicating that the sufficient presentation time of Memory array 2 allowed for the state transformation of Memory array 1 to complete before the subsequent processing of Memory array 2. Thus, we concluded that the state transformation involved a consolidation processing to transfer the online representations to the offline state, rather than natural fade-away of persistent neural activity.

In summary, the state transformation acts as a process of consolidating online memory representations into the offline state, thereby forming offline representations. This process can be completed within a sufficiently long retention interval, or continue during the presentation of subsequent stimuli when providing a deficient interval. The current findings provide fresh insights into the mechanisms of representational maintenance in the two distinct states.

Key words: visual working memory, state-based models, offline representations, state transformation, consolidation